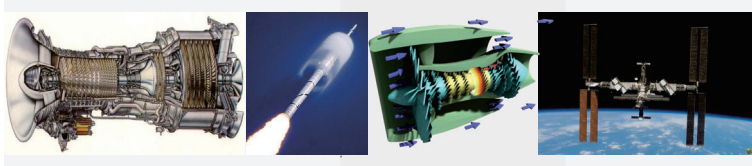


第10章 辐射换热

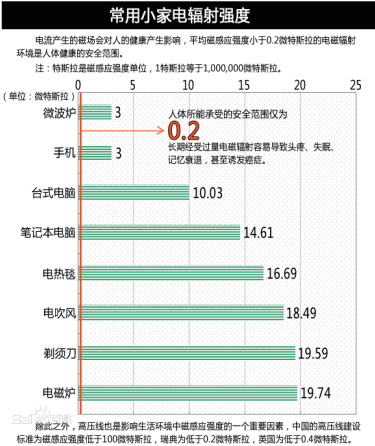


机械与动力工程学院
曹 军
2020年11月

10-1

热辐射的基本概念

- 10-1 热辐射的基本概念
- 10-2 黑体辐射的基本定律
- 10-3 灰体和基尔霍夫定律
- 10-4 角系数
- 10-5 组成封闭空间的两灰体之间的辐射换热计算

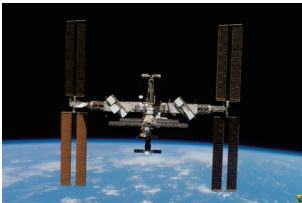


热辐射：由于热的原因产生的电磁波辐射。

- ◆ 热辐射的电磁波是物体内部微观粒子的热运动状态改变时激发出来的。
- ◆ 只要物体的温度高于绝对零度，物体总是不断把热能变为辐射能。同时，物体也不断的吸收周围物体投射到它表面上的热辐射，并把吸收的辐射能重新变为热能。

辐射传热：物体之间相互辐射和吸收的总效果。

当物体与环境处于热平衡时，其表面上的热辐射仍在不停进行，但其净辐射传热量等于零。





热辐射

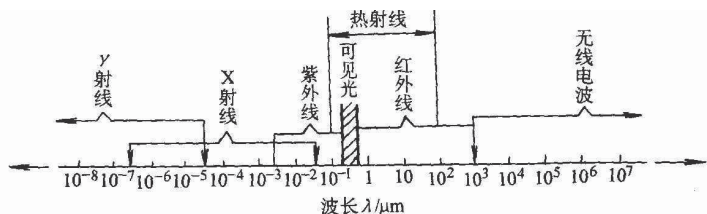
- 自然界中各个物体都不停的向空间发出热辐射，同时又不断地吸收其它物体发出的热辐射。辐射与吸收过程的**综合结果**造成了辐射传热。
- 导热与对流只有在有物质存在的条件下才能实现，热辐射可以在**真空中**传递，且在真空中辐射能的传递最有效。
- 辐射不仅产生**能量的转移**，而且还伴随着**能量形式的转换**，即发射时从热能转换为辐射能，被吸收时又从辐射能转换为热能。



电磁波与热辐射

热辐射具有一般辐射现象的共性。
各种电磁波都以光速在空间传播，热辐射同样符合。

$$c = f\lambda$$



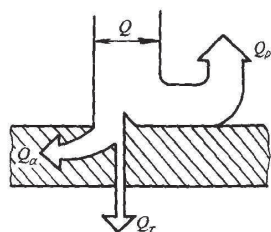
吸收比，反射比和穿透比之间的关系

投射到物体表面上的热辐射，与可见光一样也有吸收、反射和穿透现象。

$$Q = Q_a + Q_p + Q_r$$

$$\frac{Q_a}{Q} + \frac{Q_p}{Q} + \frac{Q_r}{Q} = 1$$

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$



α -吸收率、 ρ -反射率、 τ -穿透率。



热辐射的特点

- 热辐射的能量传递不需要其他介质存在，而且在**真空中传递的效率最高**。
- 在物体发射与吸收辐射能量的过程中，发生了**电磁能与热能两种能量形式的转换**。



思考题

微波炉的工作原理是什么？



利用远红外元件发射出的以远红外线为主的电磁波对物体进行加热。



吸收比，反射比和穿透比之间的关系

- 热辐射的特点
 - 固体和液体：穿透率 $\tau=0$ ， $\alpha+\rho=1$
 - 气体：反射率 $\rho=0$ ， $\alpha+\tau=1$
- 绝对黑体（黑体）：吸收率 $\alpha=1$ 的物体
- 绝对白体：反射率 $\rho=1$ 的物体
- 绝对透明体（透明体）：穿透率 $\tau=1$ 的物体

注：这里所说的黑体、白体与日常生活中所说的白色物体与黑色物体不同，**颜色只是对可见光而言**，而可见光在热辐射的波长范围中只占很小部分，所以不能凭物体颜色的黑白来判断它对热辐射吸收比的大小。

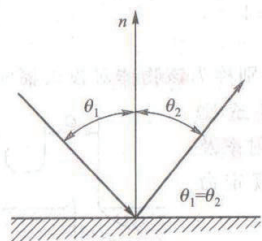
问题：黑体是否差不多都是黑颜色，或至少也是深颜色的物体？试对此问题阐述你的观点



固体表面的两种反射

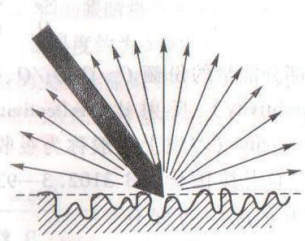
镜面反射

Specular reflection

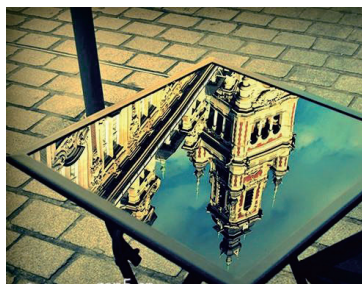


漫反射

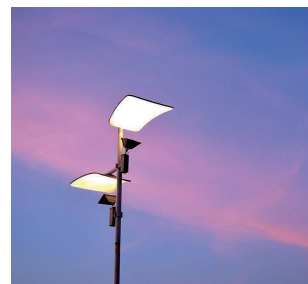
Diffuse reflection



固体表面的两种反射



镜面反射



漫反射

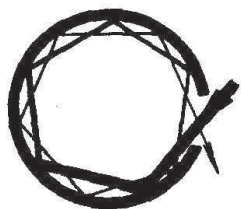


黑体模型

绝对黑体(Black body):

能吸收投入到其表面上的所有热辐射能的物体, 简称黑体。

黑体的吸收热辐射的能力最强。



小孔的面积相对越小, 吸收率就越接近于1, 即越接近绝对黑体。

如果内腔加热, 则从小孔发射出的辐射也和绝对黑体一样。



黑体模型



人工黑体模型

冶炼炉、锅炉炉膛的窥视孔可视为人工黑体



热工基础 之 传热学

10-2

黑体辐射的基本定律



黑体热辐射的三大基本定律

1. 斯忒藩—玻耳兹曼定律 (Stefan-Boltzmann定律)

揭示黑体的辐射能的大小

2. 普朗克定律 (Planck分布定律)

揭示黑体辐射能按波长分布的规律

3. 兰贝特定律 (Lambert定律)

揭示黑体辐射能按空间方向的分布规律

斯特藩—玻耳兹曼定律-辐射力的定义

辐射力表征物体**发射辐射能**本领的大小。

在**单位时间单位面积**的物体表面向其上的半球空间的**所有方向辐射出去的全部波长范围**内的能量称为该物体表面的辐射力，用符号 **E** 表示，单位为 W/m^2 。

黑体的辐射力用符号 **E_b** 表示。

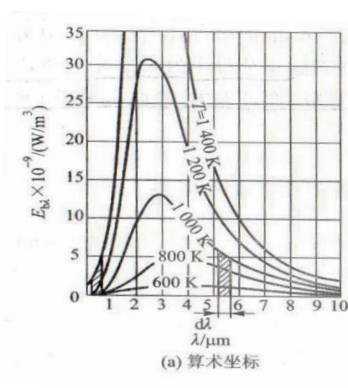
Planck分布定律-光谱辐射力

光谱辐射力 (Spectral emissive power)

单位时间内单位表面积向其上的半球空间的所有方向辐射出去的**在包含波长 λ 在内的单位波长**内的能量，记为 **$E_{b\lambda}$** 。
单位为 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{m})$ ，或者 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$

光谱辐射力随着波长变化的分布

- 在热辐射有实际意义的区段内，**单色辐射力**先随着波长的增加而增大，过一峰值后则随波长的增加而减少。
- 随着**温度**的升高，光谱辐射力取得**最大值的波长 λ_{max}** 愈来愈小。



斯特藩—玻耳兹曼定律

斯特藩—玻耳兹曼定律确定了**黑体的辐射力 E_b 与热力学温度 T 之间的关系**，其表达式为：

$$E_b = \sigma T^4 = C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

式中：

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ，称为斯特藩—玻耳兹曼常数，又称为黑体辐射常数。

C_0 称为黑体辐射系数， $C_0 = 5.67 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

说明**黑体**的辐射力 **E_b** 与热力学温度 **T** 的四次方成正比，又称为**四次方定律**。

Planck分布定律-光谱辐射力

普朗克定律

揭示了黑体的光谱辐射力**按波长的分布规律**

$$E_{b\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$$

式中：

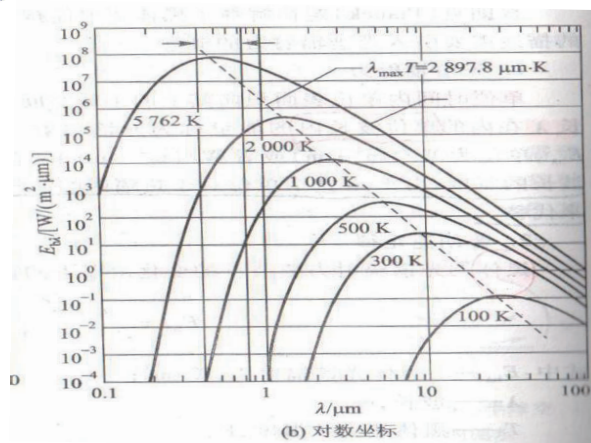
λ ——波长 (m)；

T ——黑体的热力学温度 (K)；

c_1 ——第一辐射常量，其值为 $3.74177 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ；

c_2 ——第二辐射常量，其值为 $1.43877 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

光谱辐射力随着波长变化的分布

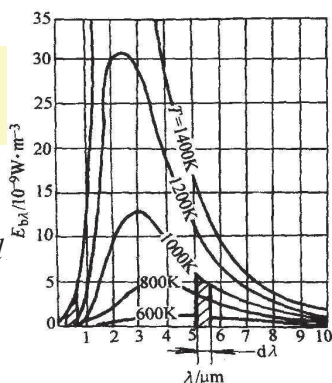




普朗克定律与斯特藩-玻尔兹曼定律的关系

光谱辐射力曲线下的面积
就是该温度下黑体的辐射力。

$$E_b = \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda = \int_0^\infty \frac{C_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/(\lambda T)} - 1} d\lambda$$



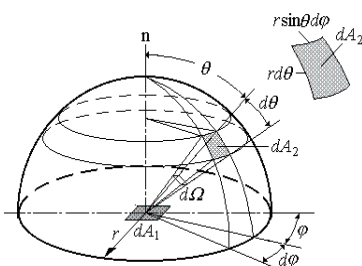
兰贝特定律-立体角

立体角

半径为 r 的球面上的面积 A 与球心所对应的是一个空间角度，用 Ω 表示，称为**立体角**，其大小定义为：

$$\Omega = \frac{A_c}{r^2}$$

立体角的单位叫**空间度**，用sr表示。



兰贝特定律-经度角与纬度角

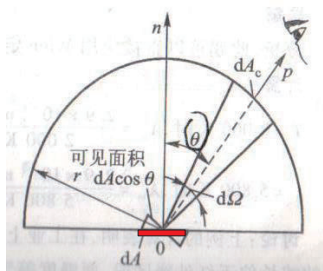
- 球坐标系中， φ 称为**经度角**， θ 称为**纬度角**。
- 空间的方向可以用该方向的经度角和纬度角来表示。
- 要说明黑体向半球空间辐射出去的能量按不同方向分布的规律，只有对**不同方向的相等的立体角**来比较才有意义。



定向辐射强度

定向辐射强度 Directional radiation intensity

从黑体单位**可见面积**发射出去的落到空间**任意方向**的**单位立体角**中的能量。



$$\text{可见面积} = dA \cos \theta$$



兰贝特定律

兰贝特定律

黑体的**定向辐射强度**是个常量，与空间方向无关。
揭示了黑体辐射能按**空间方向**的分布规律

- 黑体单位面积辐射出去的能量在空间的不同方向分布是不均匀的，按空间**纬度角** θ 的**余弦规律**变化：
在垂直于该表面的方向最大，而与表面平行的方向为零。



Wien位移定律

对应最大光谱辐射力的波长到底是多少？



Wien位移定律

对应于**最大光谱辐射力**的波长 λ_m 与热力学温度 T 之间的关系

$$\lambda_m T = 2.8976 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K} \approx 2.9 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$$



兰贝特 (Lambert) 定律

定向辐射强度是以单位可见面积作为度量依据的，
如果以实际辐射面积为度量依据，则黑体单位面积辐射出去的能量在空间的不同方向是不均匀的，是按空间纬度角度的余弦规律变化；

因而兰贝特定律又称为余弦定律。



兰贝特定律与斯特藩-玻尔兹曼定律的关系

$$E_b = I_b \pi$$

遵守兰贝特定律的黑体辐射，

数值上其辐射力等于定向辐射强度的 π 倍。



三大辐射定律的区别

黑体的辐射力由斯特藩-玻尔兹曼定律确定，辐射力正比于热力学温度的四次方。

黑体辐射能量按波长的分布服从普朗克定律。黑体的光谱辐射力有个峰值，与此峰值相对应的波长有维恩位移定律确定。

黑体辐射能量按空间的分布则服从兰贝特定律。



热工基础之传热学

10-3

灰体和基尔霍夫定律



发射率（黑度）的概念

实际物体不能完全吸收投入到其表面上辐射能量。



实际物体的辐射力 E 总是小于同温度下黑体的辐射力 E_b ，两者的比值称为实际物体的发射率(Emissivity)，习惯上称为黑度，记为 ε

$$\text{发射率(Emissivity)} \quad \varepsilon = \frac{E}{E_b}$$



实际物体的发射率影响因素

- ◆ 实际物体的发射率取决于物质种类，表面温度和表面状况。
- ◆ 发射率只与发射辐射的物体本身有关，而不涉及外界条件。
- ◆ 同一物体的发射率随温度而变化。

磨光的黄铜

0.05



无光泽的黄铜

0.22



实际物体的辐射力

一切实际物体的辐射能力都小于同温度下的黑体。

实际物体的辐射力：

$$E = \varepsilon E_b = \varepsilon \sigma T^4 = \varepsilon C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4$$

ε 的值总是小于1,与物体的种类及表面状态相关。

- E是物体自身向外辐射的热流量,不是辐射传热量
- 计算辐射传热量还要考虑投射到物体上的辐射热量的吸收过程。

辐射传热计算的基础



实际物体的光谱辐射力

- ◆ 实际物体的光谱辐射力小于同温下的黑体同一波长下的光谱辐射力,两者之比称为实际物体的光谱发射率 (Spectral emissivity)。

$$\varepsilon(\lambda) = \frac{E_\lambda}{E_{b\lambda}}$$

光谱发射率与实际物体的发射率之间有如下关系：

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{\int_0^\infty \varepsilon(\lambda) E_{b\lambda} d\lambda}{\sigma T^4}$$



实际物体的吸收比

- 实际物体的发射率小于1,不能完全吸收投射到表面上的辐射能,吸收比也小于1。
- 单位时间内从外界投入到物体的单位面积上的辐射能称为投入辐射(irradiation)
- 物体对投入辐射所吸收的百分数称为该物体的吸收比。
- 实际物体的吸收比 α 的大小取决于两方面的因素

吸收物体本身的情况

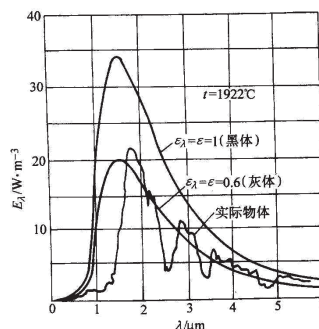


投入辐射的特性



实际物体的光谱辐射力

- ◆ 实际物体的光谱辐射力往往随波长做不规则的变化。
- ◆ 实际物体的光谱辐射力按波长分布的规律与普朗克定律不同,但定性上一致的。



实际物体的定向辐射强度

- 实际物体辐射按空间的分布,亦不尽符合兰贝特定律。
- 实际物体的定向辐射强度在不同方向上有所变化。
- 以定向发射率表征实际物体的定向辐射强度与黑体的差异。

定向发射率(定向黑度)

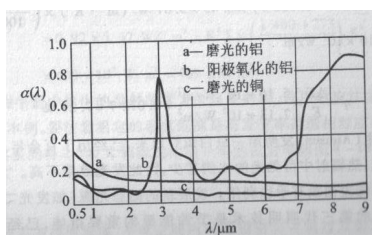
$$\varepsilon(\theta) = \frac{I(\theta)}{I_b(\theta)} = \frac{I(\theta)}{I_b}$$

$I(\theta)$: 与辐射面法向成 θ 角的方向上的定向辐射强度
 I_b : 同温度下黑体的定向辐射强度。

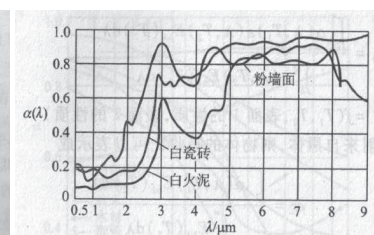


光谱吸收比

- 物体吸收某一特定波长辐射能的百分数称为光谱吸收比(Spectral absorptivity)。
- 一般来说,物体的光谱吸收比与波长以及材料本身有关。



导体的光谱吸收比



非导体的光谱吸收比



实际物体的吸收具有选择性

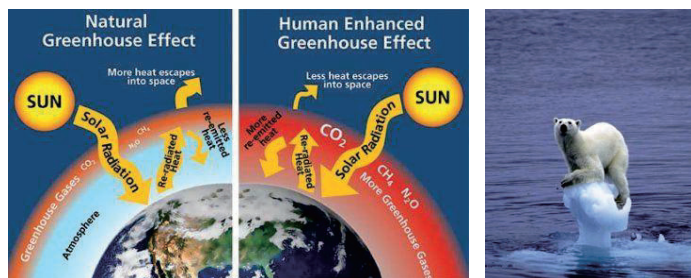
- 物体的光谱吸收比随波长而变的特性称为**物体的吸收具有选择性**。

颜色产生的本质——物体的吸收选择性



吸收选择性——温室效应

- CO₂, CFC制冷剂等对于长波辐射有较强的吸收性, 聚集在地球的外围, 相当于给地球罩了一层玻璃窗。
- 地球上一般温度物体辐射的红外范围内的热辐射大量被温室气体吸收, 无法散发到宇宙空间, 使得地球表面温度升高。



吸收选择性——温室效应

- 大部分太阳辐射能穿过玻璃/塑料薄膜进入腔内, 而吸热面发出的常温下的长波辐射却无法穿透玻璃/塑料薄膜, 被阻隔在腔内, 从而产生了温室效应。



灰体的概念及其工程应用

- 如果物体的**光谱吸收比**与波长无关, 即 $\alpha(\lambda) = \text{常数}$ 则不管投入辐射的分布如何, 吸收比 α 也是同一个常数值。这时物体的吸收比只取决于**本身的情况**而与外界情况无关。

灰体(Gray body)

- 把光谱吸收比与波长无关的物体称为灰体。

$$\alpha = \alpha(\lambda) = \text{常数}$$

对工程计算而言, 只要在**所研究的波长范围**内, 光谱吸收比基本上与波长无关, 则灰体的假设即可成立, 而不必要求在全波段范围内 $\alpha(\lambda)$ 为常数。



吸收比与发射率的关系——基尔霍夫(Kirchhoff)定律

热平衡时, 任意物体对黑体投入辐射的吸收比等于同温度下该物体的发射率。

$$\alpha = \frac{E}{E_b} = \varepsilon$$

- 在相同温度下, 一切物体的辐射力以黑体的辐射力为最大。
 - 物体的辐射力越大, 其吸收能力也越大。
- 换句话说, **善于辐射的物体必善于吸收**。



热工基础之传热学

10-4

角系数



辐射传热的角系数

- ◆ 两个表面之间的辐射传热量与两个表面之间的相对位置有很大的关系。
- ◆ 两个表面间的相对位置不同时，一个表面发出而落到另一个表面上的辐射能的百分数也不相同，从而影响到传热量。
- ◆ 本节研究表面形状及空间相对位置对该百分数的影响和计算方法。



角系数的计算假定

角系数分析的两个假设

- ◆ 所研究的表面是漫反射的。
- ◆ 在所研究表面的不同地点上向外发射的辐射热流密度是均匀的。



角系数的定义

角系数：表面1发出的辐射能中落到表面2的百分数，称为表面1对表面2的角系数(angle factor)，记为 $X_{1,2}$

$$X_{1,2} = \frac{\text{落到表面2上的由表面1发出的辐射能}}{\text{表面1向外发出的总辐射能}}$$



角系数的特性

- 物体的表面温度和发射率的改变只影响该物体向外发射的辐射能的多少，而不影响在空间的相对分布，因而也不影响能落到其他表面上的百分数。



- 角系数是一个纯几何因子，与两个表面的温度及发射率没有关系。

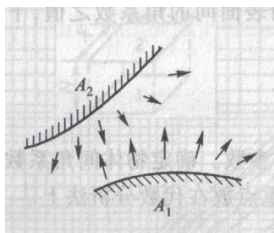


角系数的性质①

①- 相对性(Reciprocity rule)

$$A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1}$$

$$\Phi_{1,2} = A_1 E_{b1} X_{1,2} - A_2 E_{b2} X_{2,1}$$



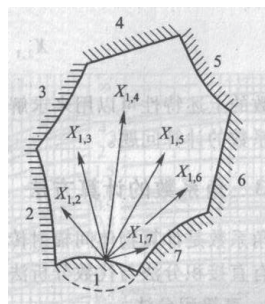
- ◆ 当 $T_1 = T_2$ 时，净辐射换热量为零，则：

$$A_1 X_{1,2} = A_2 X_{2,1}$$



角系数的性质②

②- 完整性(Summation rule)



对于由几个表面组成的封闭系统，根据能量守恒原理，从任何一个表面发射出的辐射能必全部落到封闭系统的各表面上。

$$X_{1,1} + X_{1,2} + X_{1,3} + \cdots + X_{1,n} = \sum_{i=1}^n X_{1,i} = 1$$



角系数的性质③

③- 可加性(Superposition rule)

从表面1发出的落到表面2上的**总辐射能**，等于从表面1发出落到表面2的**各个组成部分**的辐射能之和。

$$A_1 E_{b1} X_{1,2} = A_1 E_{b1} X_{1,2a} + A_1 E_{b1} X_{1,2b}$$

$$X_{1,2} = X_{1,2a} + X_{1,2b}$$

$$X_{1,2} = \sum_{i=1}^N X_{1,2i}$$



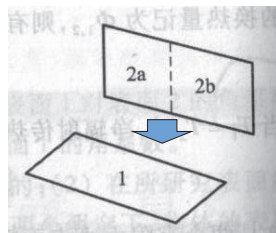
角系数的性质③

③- 可加性(Superposition rule)

$$A_2 E_{b2} X_{2,1} = A_{2a} E_{b2} X_{2a,1} + A_{2b} E_{b2} X_{2b,1}$$

$$A_2 X_{2,1} = A_{2a} X_{2a,1} + A_{2b} X_{2b,1}$$

$$X_{2,1} = X_{2a,1} \frac{A_{2a}}{A_2} + X_{2b,1} \frac{A_{2b}}{A_2}$$



从表面2发出的落到表面1上的**总辐射能**，等于从表面2的各个组成部分发出而落到表面1上的辐射能之和。



角系数的计算方法

直接积分法

代数分析法



热工基础之传热学

10-5

组成封闭空间的两灰体之间的辐射换热计算



封闭腔模型

◆ 在计算任何一个表面与外界之间的辐射传热时，必须把由该表面向空间各个方向**发射出去**的辐射能考虑在内，也必须把由空间各个方向**投入到该表面**的辐射能包括进去。

◆ 当要计算一个表面通过热辐射与外界的净换热量时，为了确保这一点，计算对象必须是包含所研究表面在内的一个封闭腔。



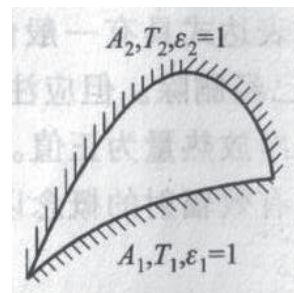
两黑体表面封闭系统的辐射传热

表面1,2间的净辐射传热量为：

发射

吸收

$$\begin{aligned} \Phi_{1,2} &= A_1 E_{b1} X_{1,2} - A_2 E_{b2} X_{2,1} \\ &= A_1 X_{1,2} (E_{b1} - E_{b2}) \\ &= A_2 X_{2,1} (E_{b1} - E_{b2}) \end{aligned}$$



黑体系统辐射传热量计算的关键在于求得**角系数**。



灰体系统的辐射传热量

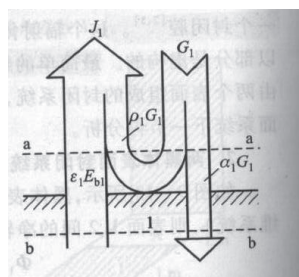
特 点

- 灰体表面的吸收比小于1，投入到灰体表面上的辐射能的吸收不是一次完成的，要经过多次反射。
- 由一个灰体表面向外发射出去的辐射能除了其自身的辐射力外，还包括了被反射的辐射能在内。



有效辐射J

有效辐射J不仅包括表面的自身辐射E，而且还包括投入辐射G中被表面反射的部分 ρG 。
 ρ 为表面的反射比。



表面1的有效辐射J₁可表示为：

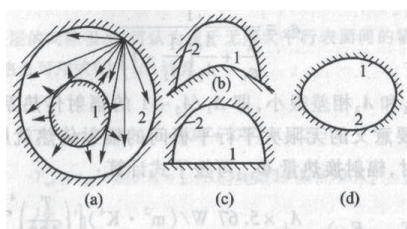
$$J_1 = E_1 + \rho_1 G_1 = \epsilon_1 E_{b1} + \rho_1 G_1 = \epsilon_1 E_{b1} + (1 - \alpha) G_1$$



两个漫灰表面组成的封闭腔的辐射传热

表面1,2间的辐射传热量：

$$\Phi_{1,2} = A_1 J_1 X_{1,2} - A_2 J_2 X_{2,1}$$



有效辐射

$$J_1 A_1 = A_1 E_{b1} - \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) \Phi_{1,2} \quad J_2 A_2 = A_2 E_{b2} - \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) \Phi_{2,1}$$

依据能量守恒定律：

$$\Phi_{1,2} = -\Phi_{2,1}$$



投入辐射与有效辐射

投入辐射：

单位时间内投入到单位面积上的总辐射能，记为G

有效辐射：

单位时间内离开单位面积上的总辐射能，记为J



有效辐射J与辐射传热量q之间的关系

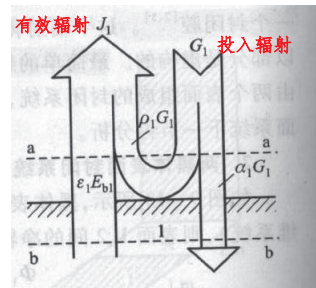
表面能量收支差额：

从外部a-a处观察：

$$q = J_1 - G_1$$

从内部b-b处观察：

$$q = E_1 - \alpha G_1$$



有效辐射J与表面净辐射换热热量q之间的关系(消去G)：

$$J = \frac{E}{\alpha} - \frac{1 - \alpha}{\alpha} q = E_b - \left(\frac{1}{\epsilon} - 1 \right) q$$



两个漫灰表面组成的封闭腔的辐射传热

$$\Phi_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}}$$

用A₁作为计算面积：

$$\Phi_{1,2} = \frac{A_1 (E_{b1} - E_{b2})}{\left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) + \frac{1}{X_{1,2}} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)} = \epsilon_s A_1 X_{1,2} (E_{b1} - E_{b2})$$

其中： $\epsilon_s = \frac{1}{1 + X_{1,2} \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) + X_{2,1} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}$

系统发射率
(系统黑度)



两个漫灰表面组成的封闭腔的辐射传热-①

表面1为平面或者凸表面: $X_{1,2}=1$

$$\Phi_{1,2} = \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) + \frac{1}{X_{1,2}} + \frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$$

$$= \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} = \varepsilon_s A_1 \times 5.67 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right]$$

系统发射率: $\varepsilon_s = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$



两个漫灰表面组成的封闭腔的辐射传热-②

表面积 A_1 和 A_2 相差很小, 即 $A_1/A_2 \rightarrow 1$

$$\Phi_{1,2} = \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) + \frac{1}{X_{1,2}} + \frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$$

$$= \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{A_1 \times 5.67 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right]}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$



两个漫灰表面组成的封闭腔的辐射传热-③

表面 A_2 比 A_1 大很多, 即 $A_1/A_2 \rightarrow 0$

$$\Phi_{1,2} = \frac{A_1(E_{b1} - E_{b2})}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - 1\right) + \frac{1}{X_{1,2}} + \frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)}$$

$$= \varepsilon_1 A_1 (E_{b1} - E_{b2}) = \varepsilon_1 A_1 \times 5.67 \left[\left(\frac{T_1}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4 \right]$$



两表面换热系统的辐射网络

有效辐射 J 与表面净辐射换热量 q 之间的关系:

$$J = \frac{E}{\alpha} - \frac{1-\alpha}{\alpha} q = E_b - \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1\right) q$$



$$q = \frac{E_b - J}{\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon}} \quad \Phi = \frac{E_b - J}{\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} A}$$



两表面换热系统的辐射网络

$$\Phi_{1,2} = A_1 J_1 X_{1,2} - A_2 J_2 X_{2,1} = A_1 X_{1,2} (J_1 - J_2)$$



$$\Phi_{1,2} = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}}$$



两表面换热系统的辐射网络

$$\Phi = \frac{E_b - J}{\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} A} \quad \Phi_{1,2} = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 X_{1,2}}}$$

换热量 Φ 相当于电流强度;

$E_b - J$ 或者 $J_1 - J_2$ 相当于电势差。

$\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon A}$ 或者 $\frac{1}{A_1 X_{1,2}}$ 相当于电阻。

表面辐射热阻

空间辐射热阻

分别取决于表面的辐射特性 ε 及表面的空间结构 $X_{1,2}$



两表面换热系统的辐射网络

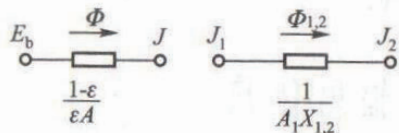
$$\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon A}$$

$$\frac{1}{A_1 X_{1,2}}$$

表面辐射热阻

空间辐射热阻

分别取决于表面的辐射特性 ε 及表面的空间结构 $X_{1,2}$

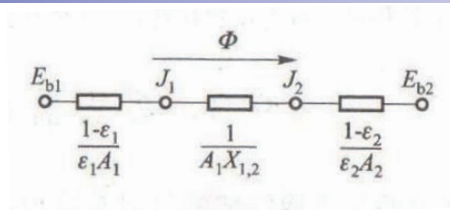


(a) 表面辐射热阻

(b) 空间辐射热阻



两表面换热系统的辐射网络



换热量计算式

$$\Phi_{1,2} = \frac{E_{b1} - E_{b2}}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 X_{1,2}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}$$

Thank you!

